

УДК 669.146-157.84:539.563

**ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ НА ВОДОРОДНОЕ ОХРУПЧИВАНИЕ ВЫСОКОАЗОТИСТОЙ
ХРОМОМАНГАНЦЕВОЙ СТАЛИ**А.С. Михно^{1,2}, М.Ю. Панченко²

Научный руководитель: доцент, д.ф.-м.н. Е.Г. Астафурова

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4, 634055

E-mail: nastia.mihno@yandex.ru**THE EFFECT OF THE MICROSTRUCTURE ON HYDROGEN EMBRITTLEMENT IN HIGH-
NITROGEN CHROMIUM-MANGANESE STEEL**A.S. Mihno^{1,2}, M.Yu. Panchenko²

Scientific Supervisor: Assoc. Prof, Phd E.G. Astafurova

¹Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050²Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,

Russia, Tomsk, Akademicheskyy pr. 2/4, 634055

E-mail: nastia.mihno@yandex.ru

Abstract. In present study, the regularities of hydrogen embrittlement in specimens of high-nitrogen chromium-manganese steel with different densities of intergranular and interphase (austenite/ferrite) boundaries and the volume fraction of ferrite are studied. It was shown that increase of the temperature of solid solution treatment decreases the density of intergranular and interphase (austenite/ δ -ferrite) boundaries and increases in the volume fraction of ferrite. The changes in the density of boundaries and ferrite volume fraction lead to a change in the susceptibility of steel to hydrogen embrittlement and hydrogen-assisted fracture micromechanism. An increase in the density of intergranular and interphase boundaries results in decrease in the hydrogen-affected loss of plasticity.

Введение. Водородная энергетика является быстро развивающейся и перспективной областью энергетической промышленности. Это обуславливает важность исследования характеристик материалов, устойчивых к воздействию водородсодержащих сред. Для большинства металлов насыщение водородом негативно отражается на механических свойствах, вызывая охрупчивание. Наиболее устойчивыми к водородному охрупчиванию среди сталей являются стабильные аустенитные стали с добавлением хрома и никеля [1]. Легирование сталей марганцем используют для замены дорогостоящего никеля. Несмотря на то, что хромомарганцевые аустенитные стали склонны к хрупкому разрушению при низких температурах и аустенит в них менее стабилен, использование марганца значительно снижает стоимость изготовления аустенитных сталей. Для стабилизации аустенита добавляют азот, что в свою очередь повышает прочностные характеристики получаемой стали, а также её коррозионную стойкость. В свою очередь, в работе [2] показали, что в высокоазотистых хромомарганцевых сталях из-за высокого содержания хрома может присутствовать феррит, оказывающий влияние на свойства стали.

Растворимость водорода в аустените выше по сравнению с ферритом, но скорость протекания диффузии водорода, напротив, гораздо выше в феррите [3]. Поэтому большой интерес представляет исследование особенностей водородного охрупчивания сталей с двухфазной (аустенит/ δ -феррит) структурой.

Цель работы – изучение влияния плотности межзеренных и межфазных (аустенит/ δ -феррит) границ и объемной доли δ -феррита на особенности водородного охрупчивания высокоазотистой хромомарганцевой стали.

Экспериментальная часть. Объектом исследования была выбрана высокоазотистая аустенитная сталь: Fe-23Cr-17Mn-0,1C-0,6N (мас. %) (ВАС). После горячей прокатки заготовок при температуре 1150°C из них были вырезаны образцы в форме двойных лопаток с размерами рабочей части $12 \times 1,3 \times 2,5$ мм. Образцы были закалены в воду после выдержки при температурах $T_z = 1100^\circ\text{C}$, 1150°C , 1200°C в течение 0,5 ч. Электролитическое наводороживание (Н) закаленных образцов проводили в течение 100 ч при комнатной температуре, плотности тока 100 А/см^2 , в 3% водном растворе NaCl, содержащем 3 г/л NH_4SCN . Для исследования фазового состава и структурных параметров стали использовался рентгеновский дифрактометр ДРОН-7 с Co-K α излучением. Снимки поверхности были получены методом световой микроскопии (СМ) на микроскопе Altamі MET 1С. Одноосное растяжение с начальной скоростью $5 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ проводили при комнатной температуре на установке LFM 125 (Walter+Bai AG).

Результаты. На СМ-изображениях поверхностей образцов после разных режимов закалки (рис. 1) наблюдали зерна феррита и аустенита. С изменением температуры обработки от 1050°C до 1200°C , происходит увеличение доли δ - феррита на 4-5%. Также, происходит рост зерна обеих фаз (для аустенита в 2,7 раз и в 2 раза для δ -феррита). Таким образом, с увеличением температуры закалки образцов происходит уменьшение плотности межфазных (аустенит/ δ -феррит) и межзеренных границ.

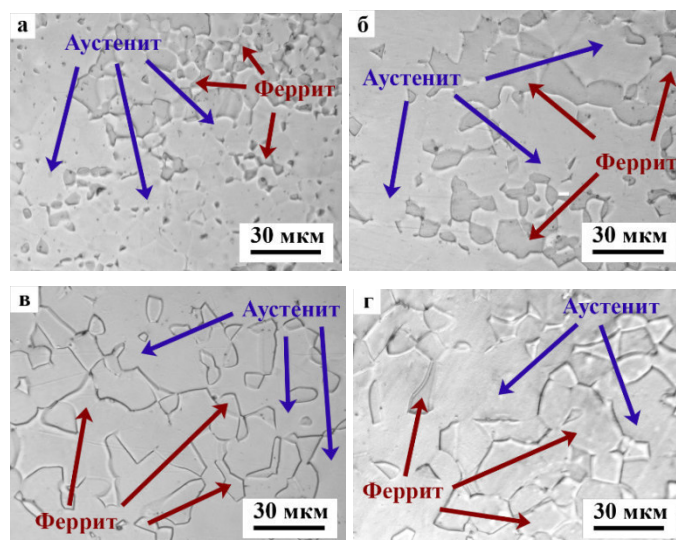


Рис. 1. Влияние температуры закалки на микроструктуру стали Fe-23Cr-17Mn-0,1C-0,6N:

а – $T_z = 1050^\circ\text{C}$, б – $T_z = 1100^\circ\text{C}$, в – $T_z = 1150^\circ\text{C}$, г – $T_z = 1200^\circ\text{C}$

Данные о влиянии режимов закалки на механические свойства образцов приведено в таблице 1. Прочностные характеристики стали до насыщения водородом зависят от температуры закалки, с повышением T_z снижается предел текучести (от 635 МПа при $T_z = 1050^\circ\text{C}$ до 578 МПа при $T_z = 1200^\circ\text{C}$),

что вызвано эффектом Холла-Петча [4]. Относительное удлинение до разрыва изменяется незначительно при повышении температуры обработки образцов. Независимо от температуры предварительно обработки, наводороживание приводит к снижению предела прочности и удлинения образцов и к увеличению предела текучести. Последнее свидетельствует о твёрдорастворном упрочнении исследуемой стали атомами водорода. Чем меньше плотность межфазных и межзеренных границ (крупнее зерна), тем значительнее водородно-индуцируемый прирост предела текучести в стальных образцах. Коэффициент водородного охрупчивания (K_H), отражающий потерю пластичности, вызванную водородом, имеет самые низкие значения для образцов, в структуре которых формировали максимальную плотность границ ($T_z = 1050^\circ\text{C}$). С увеличением температуры закалки коэффициент K_H значительно возрастает: от 10% до 32%. Этот эффект связан с тем, что большая плотность межзеренных и межфазных границ в образцах, обеспечивает формирование большего количества мест для преимущественного накопления водорода на границах и способствует уменьшению диффузии водорода вглубь образца, уменьшая тем самым негативное влияние водорода.

Таблица 1

Влияние режимов закалки и наводороживания на механические свойства стали

Режим обработки	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{пр}$, МПа	δ , удлинение, %	K_H , %
$T_z = 1050^\circ\text{C}$	635	1403	60	10
$T_z = 1050^\circ\text{C}+\text{H}$	655	1415	54	
$T_z = 1100^\circ\text{C}$	615	1480	59	15
$T_z = 1100^\circ\text{C}+\text{H}$	638	1289	50	
$T_z = 1150^\circ\text{C}$	599	1446	58	23
$T_z = 1150^\circ\text{C}+\text{H}$	620	1241	43	
$T_z = 1200^\circ\text{C}$	578	1437	53	32
$T_z = 1200^\circ\text{C}+\text{H}$	630	1129	36	

Примечание. Коэффициент водородного охрупчивания $K_H = [(\delta_0 - \delta_H) / \delta_0] \times 100\%$, δ_0 и δ_H

Закключение. Экспериментально установлено, что снижение плотности межзеренных и межфазных (аустенит/ δ -феррит) границ в структуре повышает склонность ВАС к водородному охрупчиванию.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90129.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Martin M., Weber S., Theisen W., Michler T., Naumann J. Effect of alloying elements on hydrogen environment embrittlement of AISI type 304 austenitic stainless steel. // Int J Hydrogen Energy – 2011. – Vol. 36. – P. 15888–98.
2. Lynch S. Hydrogen embrittlement phenomena and mechanisms. Hydrogen embrittlement phenomena and mechanisms. // Corrosion reviews. – 2012. – Vol. 30. – P. 105–123.
3. Liang X.Z., Zhao G.H., Dodge M.F., Lee T.L., Dong H.B., Rivera-Díaz-del-Castillo P.E.J. Hydrogen embrittlement in super duplex stainless steels. // Materialia – 2020. – Vol. 9. – P. 100524.
4. Gavrilyuk VG, Berns H. High nitrogen steel. – Berlin: Springer; 1999. – 373p.